

산지재해 연구를 위한 토석류 실험장치의 개발 방안*

전병희, 전계원**, 장창덕

최근 자연재해는 기후변화의 영향으로 그 발생빈도가 증가하고 있다. 또한 우리나라의 경우 전국토의 70%이상이 산지로 구성되어 있어 산지재해에 대한 연구가 필요한 실정이다. 2006년 강원도에 발생한 대규모 산지재해, 2011년 7월 발생한 서울시 우면산 일원 및 춘천시 천전리 일원의 산사태 및 토석류 재해는 대표적인 산지재해에 해당된다. 본 연구에서는 최근 증가하고 있는 산지재해의 종류 및 특성에 관해 조사하였고 그중 토석류 재해의 특성을 좀 더 명확히 분석하기 위해 국내외 토석류 실험장치를 소개하고 국내 여건에 맞는 토석류 실험장치의 개발 방안을 제시하였다.

주제어: 토석류, 산지재해, 실험장치

1. 서론

최근 기후변화에 따른 기상이변으로 인해 자연재해 발생빈도가 매년 증가하고 있으며, 특히 집중호우, 태풍 등에 의한 사면붕괴, 산사태 및 토석류에 의해 막대한 경제적 손실과 인명피해가 빈번하게 발생하고 있다. 강원도지역의 경우 대부분이 급경사의 산악지로 구성되어 있어 산사태나 토석류의 피해가 커지고 횡수 또한 증가하고 있다. 토석류재해는 붕괴된 토석이 물과 함께 침식과 퇴적을 반복하며 하류로 흘러내려 순식간에 큰 피해를 발생시키는 특징을 가지고 있다. 토석류에 대한 연구는 일본과 대만 오스트리아 등 토석류가 자주 발생하는 나라에서 모형실험, 수치모형해석, 현장조사와 모니터링 등의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 국내에서는 연구자료의 부족, 학문적인 융합연구의 필요성 때문에 토석류 해석을 위한 연구에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다(전계원 외, 2011). 또한 국내의 경우 토석류 제어시설에 대한 명확한 규정 및 법규가 없어 획일적으로 설계와 시공이 이루어지고 있으며 유지관리는 거의 전무한 상태이다(김기환 외, 2008).

* 본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비지원(과제번호#08지역기술혁신 B01-01)으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

** 교신저자.

따라서 본 연구에서는 산지재해의 종류 및 특성을 파악하고 최근 발생빈도가 증가하고 있는 토석류에 의한 피해를 저감 하기위한 국내의 연구성과를 검토하였고 토석류 흐름해석 및 제어시설 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있도록 다양한 토석류 실험장치를 검토하고 국내여건에 맞는 실험장치를 제안하였다.

II. 산지재해의 종류 및 특성

1. 산사태

산지에서 발생 가능한 가장 대표적인 재해는 산사태이며 산사태의 발생원인 및 종류는 매우 다양하다. 산사태(landslides)는 지질, 지형 및 기상 등 여러 가지 원인에 의해 산지를 구성하는 토사물질이 경사면을 따라 아래로 흘러내리는 것을 말한다. 발생원인은 크게 자연적 요인과 인공적 요인의 두 가지로 구분할 수 있다. 자연적인 요인은 지질, 토질, 지질구조 및 지형 등 잠재적 취약요인과 강우, 지하수, 하천 및 해안에서의 침식, 지진 등의 직접적인 요인으로 구분 할 수도 있다.

산사태는 그 규모와 이동속도 및 붕괴형태에 따라 매우 다양하며 다음과 같이 분류할 수 있다.

- ① 활동(slide) : 암반이 약한 면을 따라 경사면과 평행하게 이동하는 형태.
- ② 주저앉음(slump) : 아래의 흩이 꺼지면서 상부의 토양이 주저앉는 경우로 주변에서 가장 자주 볼 수 있음.
- ③ 유동(flow) : 토양의 점성액체 같은 이동으로 폭우로 인한 물의 침투로 지지력이 약화되는 경우 발생하게 됨.
- ④ 전도(topple) : 우리나라에서는 제주도 해안가에서 주로 볼 수 있는 현상으로 몇몇 토체의 전방 회전에 의한 중력 및 힘의 작용에 의해 발생하는 경우와 균열에서의 유체에 의해 발생하는 두 가지로 분류할 수 있음.
- ⑤ 포행(creep) : 사면을 형성하고 있는 흩이나 암반이 미세하게 시간의 경과에 따라 느리고 일정하게 이동하는 현상으로 굵은 나무줄기나 기울어진 기둥 및 작은 흩주름 등에 의해 확인 할 수 있음.
- ⑥ 급류(torrent) : 산발적이고 갑작스런 물과 잔해물이 하천의 형태처럼 또는 하천 상류부의 계곡 등을 따라 유출되는 현상으로 폭우가 동반된 산사태에서 주로 발생하게 됨.
- ⑦ 낙하(fall) : 수직절리가 잘 발달된 가파른 사면에서 토양 및 암반이 자유낙하 하는 현상이며 주로 중력, 역학적인 풍화, 틈새의 물의 존재에 영향을 받는다. 지반의 종류에 따라 rockfall, soil fall, debris fall, earthfall, boulder fall 등으로 구분할 수 있음.

2. 토석류

1) 토석류의 종류

우리나라 산사태의 대부분은 단기간에 걸친 국지적인 집중호우로 인한 흐름(flow) 형태의 산사태이며 1999년 한국지질자원연구소의 보고에 의하면 경기도 연천군 및 강원도 철원군 일대를 연구지역으로 분석한 결과 토석류(debris flow)형태의 산사태가 전체의 89%를 차지하고 있는 것으로 나타나고 있다(김진호, 2002). 토석류는 피해의 범위와 유동형태의 특징으로 인해 산사태와 구분할 수 있는데 산사태의 경우 마을이나 시설물과 거리가 떨어진 산지사면에서 발생할 경우 직접적인 피해를 일으키지 않지만 토석류는 계류를 타고 빠른 속도로 흘러내리면서 규모를 확대하여 하류에 많은 인적 물적 피해를 발생시킨다.

토석류는 과거로부터 여러 가지 방법으로 분류하여 왔는데 발생형태에 따라서는 사면형 토석류(open slope debris flow)와 수로형 토석류(channelized debris flow)로 구분할 수 있다. 사면형 토석류는 수로에서 발생하는 것이 아니라 사면의 파괴로 인해 사면내에서 발생한다. 이 경우 사면의 경사도에 의존하여 이동거리가 짧고 발생량도 비교적 적은편이다. 반면 수로형 토석류는 물로 포화된 다양한 입경의 입자들이 수로 및 협곡을 따라 수십 내지 수백 km까지 이동하는 흐름이다.

토석류의 발생원인에 대한 일본의 조사에 따르면 다음과 같은 네 가지 형태로 구분할 수 있다.

① 대규모 산사태 원인형(19%) : 주로 산허리, 계안에 발생된 대규모 산사태가 원인이 되는 것으로 규모가 크고 돌발성으로 피해도 큼.

② 소규모 산사태 원인형(32%) : 소규모로 발생한 산사태가 원인이 되어 계류에 쌓인 토석을 휩쓸어서 양과 세력을 증가시켜 흘러내리는 것.

③ 다수의 소규모 산사태 원인형(44%) : 유역 내 곳곳에서 발생된 산사태에 의한 토석이 계류에서 서로 합쳐져 토석류로 발전하는 것.

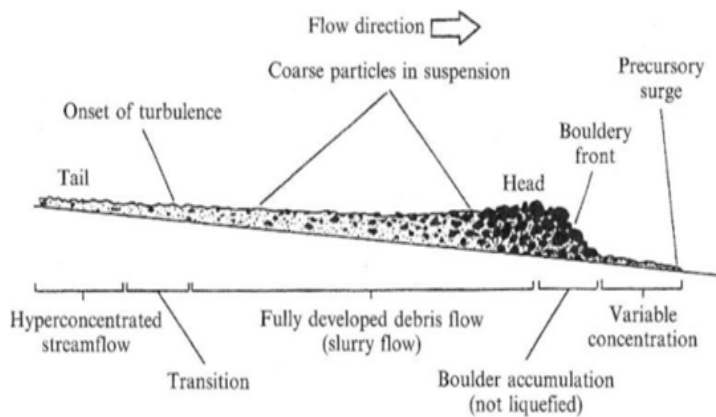
④ 계류에 퇴적된 토석 원인형(5%) : 산사태가 아닌 다량의 물로 거의 포화상태의 계류의 토석 자체가 흘러내리거나 구곡침식(gully erosion)을 받아서 토석류로 발전하는 것.

2005년 이후 우리나라에서 촬영한 토석류 피해지역의 항공영상에 따르면 토석류 발생원인의 대부분은 집중호우로 인한 얇은 소규모 산사태가 집중되어 있어 앞의 분류 ③에 해당되는 경우가 많다(이창우, 2010).

2) 토석류의 흐름 특성

토석류는 대부분 0.5~20m/sec의 속도를 가지는 것으로 알려져 있으며 토석류의 구성성분으로는 유

목을 비롯하여 콜로이드 성분의 세립질에서 부터 수 미터 크기의 암석까지의 토석으로 이뤄져 있어 그 크기가 매우 다양하다. 토석류의 구성물질은 주로 나라와 지역의 지질학적인 구성과 식생의 상태에 따라 좌우된다. 토석류의 흐름은 선단부, 본체, 말단부로 나누어 구분할 수 있는데 선단부는 큰 입경의 바위가 위치하여 회전과 붕괴 과정을 거치며 진행하고 본체는 중앙이 볼록한 횡단형을 갖는다. 말단부는 세립의 입자와 비교적 많은 물을 포함하여 농도류 형태의 흐름을 갖는다. 토석류의 흐름은 발생시 소규모이나 침식력이 매우 강하여 하류로 이동하면서 계상과 계안의 퇴적을 침식하여 그 규모를 확대한다. 일반적인 토석류 발생부의 경사는 25° 이상이며 유동부는 15°의 경사 이상이라고 할 수 있다. 퇴적부는 15°미만에서 서서히 발생하며 10°미만이 되면 전반적으로 퇴적한다.



<그림 1> 토석류의 흐름도(Pierson, 1986)



<그림 2> 토석류의 퇴적부 전경(강원도 한계령 인근)

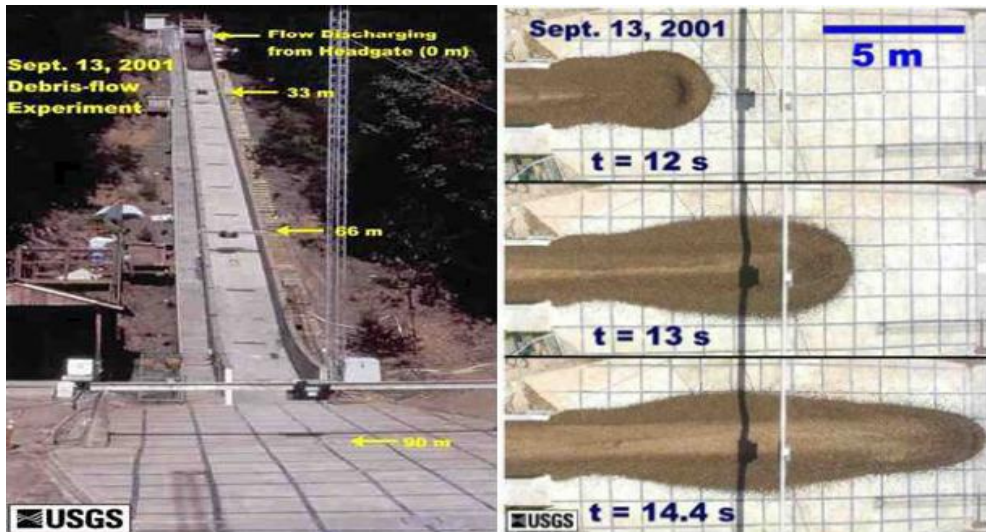
III. 토석류 실험장치

1. 국외 토석류 실험장치



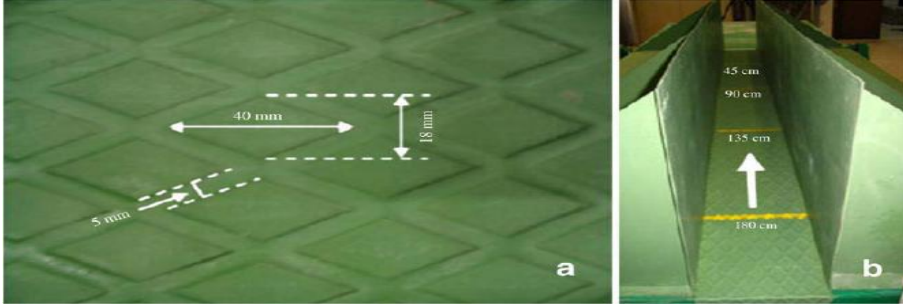
<그림 3> 교토대 방재연구소 토석류 실험장치

일본 교토대 방재연구소의 토석류 실험장치는 컨베이어 벨트에 의한 토석재료 수송으로 인한 지속적인 재료 공급이 가능한 실험장치에서부터 퇴적경향을 분석할 수 있는 실험장치 및 사방댐모형을 제작/적용하여 토석류 포착과 사방댐 상류에서의 퇴적을 분석하는 다양한 실험장치를 제작하여 연구를 수행하고 있다.



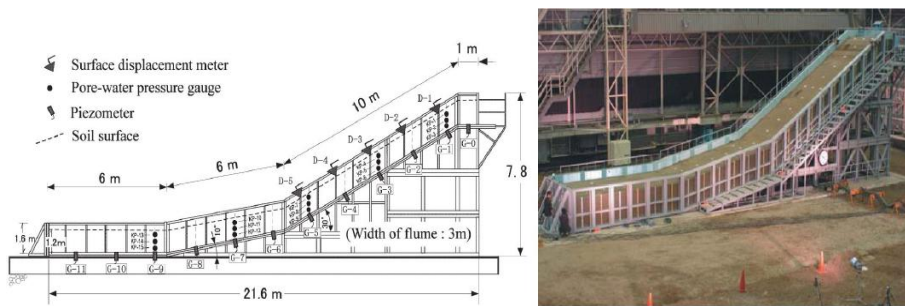
<그림 4> 미국 USGS 대규모 토석류 실험장치

미국 USGS에서는 1999년부터 총길이 90m에 달하는 대형 수로를 제작하여 각종 센서를 장착하고 대규모 토석류 실험을 지속적으로 수행하고 있다. 이 수로는 야외 자연지형을 이용하여 콘크리트구조물로 제작되어 경사의 변형을 불가능하다.



<그림 5> 이탈리아 Padova 대학교 토석류 도달거리 산정을 위한 토석류 실험장치

이탈리아 Padova 대학교에서는 이탈리아 알프스지역에서의 토석류 도달거리를 산정하기 위하여 바닥에 무늬가 있어 조도를 생성하는 강관토석류수조를 제작하여 volume balance, limiting topographic 및 empirical equations을 이용한 방법과 도달거리를 비교하였다.



<그림 6> 초대형 실규모 사면 모형실험장치

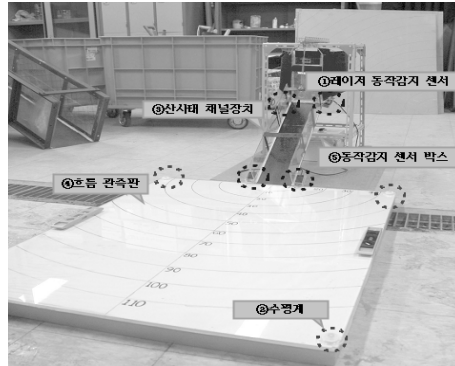
Moriwaki et al.(2004)는 폭 3m 길이 23m의 대형 사면을 제작하고 주요부위에 간극수압계와 변위계 등의 센서를 설치하고 강우에 의한 산사태로 인한 파괴거동에 대해 분석하였다.

2. 국내 토석류 실험장치



<그림 7> 강릉원주대 토석류 횡단배수로 실험장치(김영일 외, 2010)

강릉원주대학교에서는 횡단배수로에서의 토석류 흐름을 분석하기 위해 상류에서 혼합발생시킨 다양한 농도의 토석류가 임의 경사의 횡단배수로를 통과하는 실험을 수행하였다. 지그재그 형태의 상류장치를 통한 재료의 혼합으로 토석류를 발생시키는 특징을 가졌으며 하류단 횡단배수로의 경사조절이 가능하다.



〈그림 8〉 상지대학교 토석류 확산실험장치

상지대학교에서는 다양한 비율로 혼합된 토석류를 상류에서 일시에 개방하여 하류단에서의 퇴적현상을 관찰하는 토석류 장치를 제작하여 물과 토사의 비율에 따른 확산거리 및 퇴적양상을 조사하였다.



〈그림 9〉 강원도립대학 토석류 실험장치

강원도립대에서는 인공강우장치와 전 구간 경사조절이 가능한 토석류 실험장치를 제작하여 강우강도와 하상재료의 구성비에 따른 토석류 발생 거동특성에 대한 연구를 수행하였다(최준식, 2011).

3. 토석류 실험장치의 제안

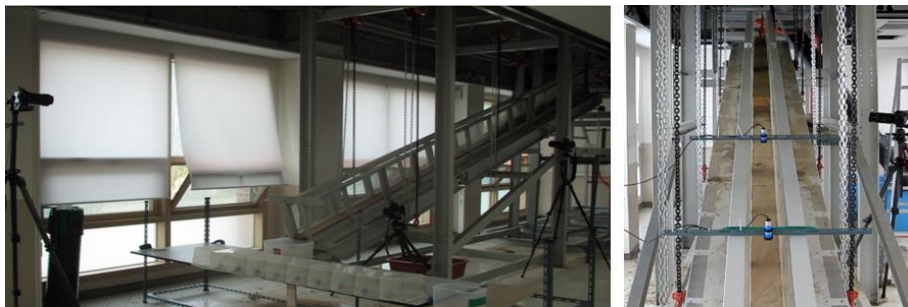
기존 토석류 실험장치를 분석하여 토석류 유동특성을 분석하고 토석류 저감시설의 효과분석과 퇴적

특성을 파악하려는 연구목적에 적합한 토석류 실험장치를 고안하였다. 본 실험장치는 국내에서의 토석류 발생이 급경사에서 발생하여 계류를 만나 완만한 경사를 따라 유하하는 특성에 적합하게 상단, 중단, 하단의 3단 각 2m로 구성하여 총 3단 6m 길이의 경사조절 가능한 장치이다. 또한 하상 폭의 변화에 의한 흐름의 영향을 분석할 수 있게 10cm에서 40cm까지 조절이 가능한 수로를 제작하였고 유량공급장치와 3단의 수조 및 퇴적장치가 각각의 모듈로 분리될 수 있게 설계하여 조건에 따라 분리·결합 할 수 있게 하였다.

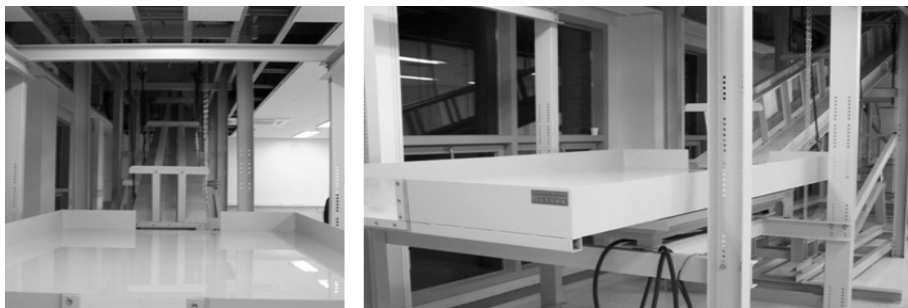
수로 측면은 1cm 간격의 눈금이 표기된 아크릴로 제작하여 흐름을 가시화하기 편리하게 하였고 강재로 보강하였다. 수로의 바닥은 강재로 제작되어 일정간격으로 간극수압계 등의 센서를 설치할 수 있는 작은 구멍을 뚫었으며 평상시에는 스테인리스나사로 막아둔다. 바닥은 일정 조도를 형성하기 위해 합판을 설치하고 추후 토석류 저감시설을 장착할 수 있게 하였다. 수로에는 초음파수위계를 장착하여 토석류의 유동심과 선단부의 형상을 계측할 수 있게 하였다.

퇴적장치 하단에는 로드셀을 설치하여 모니터링 단말기를 통해 퇴적되는 토사의 중량을 실시간으로 측정할 수 있게 조치하였고 퇴적부 바닥에 퇴적거리를 가시화 할 수 있는 거리를 표기하였다.

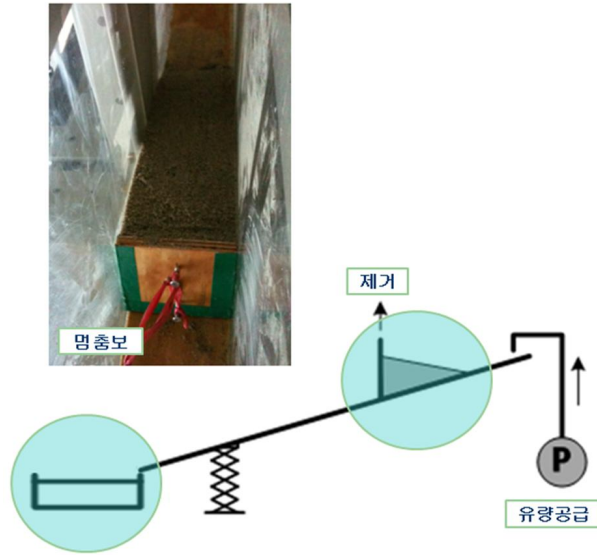
발생된 토석류의 농도 및 유량을 분석할 경우 하단 퇴적부를 분리하여 토석류 시료 샘플장치를 설치하면 유출 토석류의 유량과 농도를 측정할 수 있다. 유량공급은 용량식 유량계와 위어를 이용하여 조절할 수 있으며 바닥에 설치되어 있는 저수조에서 펌프를 이용하여 공급하게 된다.



<그림 10> 개발된 토석류 실험장치



<그림 11> 토석류 퇴적장치



<그림 12> 개발된 토석류 실험장치를 이용한 예비실험 전경

IV. 결론

본 연구에서는 2011년 7월 발생한 서울 우면산 산사태 및 토석류 피해사례와 춘천 천전리 재해 사례 등 최근 증가하고 있는 집중호우에 의한 산지재해의 종류 및 그 특성을 파악하기 위해 산사태, 토석류의 종류와 특성을 조사하였다. 또한 토석류 유동특성, 유하거리 등 토석류 연구의 기초자료를 제공할 수 있는 토석류 실험장치의 개발을 위해 국내외에서 개발되어 사용하고 있는 실험장치를 소개하고 분석하였다. 그 결과를 토대로 국내 토석류 발생특성 및 유동특성을 실험할 수 있는 토석류 실험장치를 제안하였다. 제안된 실험장치는 토석류의 발생부, 유하부, 퇴적부를 모사할 수 있도록 3단으로 구성되어졌고 하상의 폭을 변화할 수 있게 제작되어 향후 국내 토석류의 발생 및 흐름특성 해석과 토석류 해석모형의 매개변수 검증시 효과적으로 사용될 것으로 판단된다.

참고문헌

김건호. 2002. GIS 기법을 이용한 토석류 발생 위험도 분석에 관한 연구. 홍익대학교 대학원 석사학위 논문.
 김기환. 오세준. 김대희. 이승호. 2008. 토석류 제어시설 개발을 위한 기초장비 제작에 관한 연구(I).

- 2008 대한토목학회 정기학술대회. 3082-3085.
- 김영일. 백중철. 2010. 사각형 수로에서 토석류 흐름 수리모형 실험. 2010 대한토목학회 정기학술대회. 279-282.
- 이창우. 2010. 토석류 특성과 대책. 산림. 2012년 6월호. 84-87.
- 전계원. 전병희. 장창덕. 2011. 토석류 농도분석을 위한 실험적 연구. 2011 대한토목학회 정기학술대회. 37-49.
- 최준식. 2011. 인공강우를 고려한 토석류 거동특성에 관한 모형실험. 강원대학교 대학원. 석사학위논문.
- Moriwaki, H., Inokuchi, T., Hattanji, T., Sassa, K., Ochiai, H., Wang, G., 2004, Failure Processes in a Full-scale Landslide Experiment Using Rainfall Simulator. *Landslides 4, Japan*. 277-288.

田炳熙: 동경공업대학에서 공학박사학위(논문제목: “Study on Porous Carrier and Membrane Hybrid Process for Nitrogen Removal in Wastewater”, 2000년 3월)를 취득하였으며, 현재는 강원대학교 삼척캠퍼스 소방방재학부 부교수로 재직 중이다. 주 연구분야는 패턴분류를 이용한 수처리장치 고장진단과 산지재해 분야이며, 현재 방재학회 회원 등으로 활동 중이다(bhjun@kangwon.ac.kr)

全桂元: 충북대학교에서 공학박사학위(논문제목: “홍수유출과 수질예측을 위한 Web기반 시스템의 개발”, 2004년 2월)를 취득하였다. 현재 강원대학교 방재전문대학원에서 부교수로 재직중이며 돌발홍수, 산지하천재해, 토석류재해에 관한 방재분야에 관심을 가지고 있다. “산악지역돌발홍수 기준우량 결정에 관한 기초연구”(2010), “지상 LiDAR를 이용한 토석류 발생량 추정에 관한 기초연구”(2010)등의 논문을 게재한 바 있다(kwjun@kangwon.ac.kr).

張昌德: 강원대학교에서 공학박사학위(논문제목: “하도형상 변화를 고려한 격자기반 토석류 해석모형의 개발”, 2012년 2월)를 취득하고 현재 강원대학교 소방방재학부 외래교수로 재직 중이다. 해안재해, 토석류, 수치모형 분야에 관심을 두고 연구 중이다(cdjang79@kangwon.ac.kr).

투 고 일: 2012년 05월 15일

수 정 일: 2012년 05월 27일

게재확정일: 2012년 06월 11일

A Study on Development of Debris Flow Experimental Equipment for Mountainous Disaster

Byong Hee Jun, Kye Won Jun, Chang Deok Jang

Recently the possibility of the natural disaster has been increased around the world to the climate change. In addition, more than 70 percent of the land of our country consists of mountains. So it is necessary to study for mountainous disaster. Large-scale disasters occurred in mountainous Gangwon Province in 2006, Debris flow that occurred in July 2011 in Seoul and Chuncheon is a typical mountainous disaster. In this study, the type and characteristics of mountainous disaster were investigated. Developed based on debris experimental device was introduced at domestic and foreign in order to analyze the characteristics of debris flow. And domestic conditions considering the development of debris flow experimental equipment is suggested.

Key words: debris flow, mountainous disaster, experimental equipment